

Evaluación regional de inestabilidades de ladera por efecto sísmico: Mapas de desplazamiento de Newmark para la Cuenca de Lorca (SE España)

Regional assessment of seismically induced slope instabilities: Newmark displacement maps for the Lorca Basin (SE Spain)

M.J. Rodríguez Peces¹, J. García Mayordomo² y J.M. Azañón Hernández¹

- ¹ Dpto. de Geodinámica. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada, C/Fuentenueva s/n. 18002. Granada. marpeces@ugr.es, jazonon@ugr.es
² Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/La Calera, 1 Tres Cantos (Madrid) 28760. julian.garcia@igme.es

Resumen: El sureste de España está caracterizado por una sismicidad de baja a moderada magnitud. Sin embargo, los terremotos de baja magnitud ($M_w=4.0-4.5$) pueden producir daños significativos en las edificaciones, así como inestabilidades de ladera (caída de rocas, principalmente). En este trabajo se presenta un mapa de desplazamientos de Newmark para la Cuenca de Lorca considerando diferentes escenarios sísmicos. Para su construcción se ha elaborado un mapa litológico basado en los mapas geológicos del IGME, asignando a cada unidad valores de peso específico, cohesión y ángulo de fricción obtenidos de bibliografía y de ensayos geotécnicos. Estos mapas se combinan con el mapa de pendientes generado a partir de un modelo digital de elevaciones (MDE) para obtener un mapa de factores de seguridad estáticos. Combinando éste con el de pendientes se obtiene el mapa de aceleraciones críticas (a_c) que representa la susceptibilidad sísmica al deslizamiento. Se han considerado varios escenarios sísmicos para los que se ha aplicado factores de amplificación del terreno y topográfico para obtener los mapas de aceleración sísmica máxima (PGA). Los desplazamientos de Newmark (D_N) se obtienen empleando una ecuación empírica en función del ratio K (a_c/PGA). Los mapas obtenidos permiten identificar las áreas de potencial riesgo en la Cuenca de Lorca. En general, las inestabilidades esperables serán de tipo desprendimiento, particularmente caídas de rocas.

Palabras clave: SIG; Newmark; Deslizamientos; Terremotos; Peligrosidad sísmica.

Abstract: South-eastern Spain is characterized by low to moderate magnitude seismicity. Nevertheless, low magnitude earthquakes ($M_w=4.0-4.5$) can produce significant damage on constructions, as well as induced slope instabilities, mainly rock falls. In this work, we present a map in terms of Newmark displacement as a first approximation to the study of particular seismically induced slope instabilities. For the construction of this map we used a GIS to elaborate a lithological map based on the geological maps from the Spanish Geological Survey (IGME). Specific weight, cohesion and friction angle values were assigned to each lithological unit based on bibliography and geotechnical tests. A slope map produced from a digital elevation model (DEM) was combined with these maps to obtain a map of static factor of safety. Then, it was combined with the slope map to obtain the critical acceleration map. This map represents seismic landslide susceptibility. Several seismic scenarios have been considered. For each seismic scenario soil and topographic amplification factors were considered to obtain the peak ground acceleration (PGA) maps. These maps were combined with the critical acceleration map for each seismic scenario to obtain Newmark displacement maps. Our results show that slope instability occurs at small areas, mainly rock falls.

Key words: GIS; Newmark; Landslides; Earthquakes; Seismic hazard.

INTRODUCCIÓN

En 1965, el Ingeniero Civil N.M. Newmark ideó un sencillo método para estimar el desplazamiento permanente producido por un movimiento sísmico en presas de tierras (Newmark, 1965). Éste método, con ligeras variaciones, fue posteriormente aplicado con éxito al estudio de laderas naturales. Actualmente, el método de Newmark, aplicado con la tecnología SIG es una herramienta potente para estimar a nivel regional la ocurrencia de deslizamientos por efecto sísmico (e.g. Jibson *et al.*, 1998).

El método de Newmark (1965) establece que, dada una ladera con factor de seguridad conocido, la aceleración crítica que produce desplazamiento permanente es:

$$a_c = (FS - 1) g \sin(\alpha) \quad [1]$$

donde a_c es la aceleración crítica, en unidades g, g es la aceleración de la gravedad, FS es el factor de seguridad estático y α es el ángulo del talud. Conocida ésta, el desplazamiento permanente, o desplazamiento de Newmark (D_N), se estima a partir de un acelerograma representativo del movimiento en el emplazamiento. Para la aplicación del método a nivel regional se emplean ecuaciones empíricas que relacionan el D_N con

la aceleración pico (PGA), con la magnitud del terremoto, la intensidad de Arias,... (cf. Jibson, 2007).

El objetivo de este trabajo es realizar un mapa de desplazamientos de Newmark de la Cuenca de Lorca mediante la tecnología SIG (ArcGIS) considerando diferentes escenarios sísmicos (Rodríguez-Peces, 2008). En la Cuenca de Lorca, y zonas aledañas, se tiene constancia de la ocurrencia de desprendimientos por efecto de terremotos. Los ejemplos más recientes son los terremotos de Mula en 1999 ($m_{BLg}=4.8$, $I_{EMS}=VI$), Bullas en 2002 ($m_{BLg}=5.0$, $I_{EMS}=V$) y La Paca en 2005 ($m_{BLg}=4.7$, $I_{EMS}=VI-VII$). La Fig. 1 representa un mapa geológico del sureste de España en el que se muestra la localización de la Falla de Alhama de Murcia (FAM) y del área de estudio.

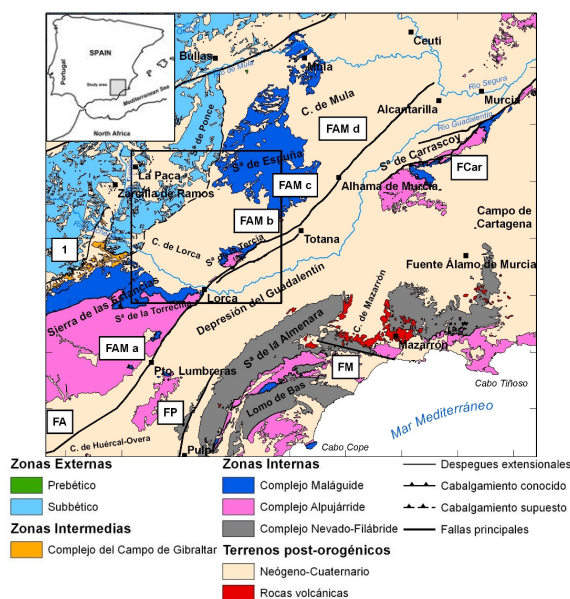


FIGURA 1. Mapa geológico del sureste de España. 1: Contacto Zonas Internas-Zonas Externas, FCar: Falla de Carrascoy, FM: Falla de las Moreras, FAM: Falla de Alhama de Murcia (a: segmento Pto. Lumbreras-Lorca, b: segmento Lorca-Totana, c: segmento Totana-Alhama y d: segmento Alhama-Alcantarilla).

METODOLOGÍA

La elaboración de un mapa de desplazamientos de Newmark (D_N) implica, en primer lugar, la obtención de un mapa del factor de seguridad estático de las laderas que, combinado con un mapa de pendientes, permite obtener el mapa de aceleraciones críticas (a_c). Dado que la a_c es la aceleración mínima requerida para iniciar la inestabilidad, éste mapa puede considerarse un mapa de susceptibilidad sísmica al movimiento.

El cálculo del factor de seguridad se realiza de acuerdo con la formulación propuesta por Jibson *et al.* (1998):

$$FS = \frac{c'}{\gamma t \sin \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} - \frac{m \gamma_w \tan \phi'}{\gamma \tan \alpha} \quad [2]$$

donde c' es la cohesión efectiva, ϕ' es el ángulo de rozamiento interno efectivo, α es el ángulo del talud, γ es el peso específico del material del talud, γ_w es el peso específico del agua, t es el espesor normal a la

superficie de rotura y m es el grado de saturación de la superficie de rotura.

La obtención del mapa de factores de seguridad estáticos se ha realizado partiendo de la cartografía geológica digital del IGME a escala 1:50.000 y 1:200.000. Con base en estos mapas, se elaboró un mapa litológico, donde cada unidad estaba caracterizada por sus parámetros resistentes (peso específico, cohesión y ángulo de fricción). Estos datos se tomaron de bibliografía geotécnica, así como de algunos ensayos geotécnicos. Posteriormente, se computó el mapa litológico con el mapa de pendientes, obtenido a partir de un modelo digital de elevaciones (MDE), y se obtuvo el mapa de factores de seguridad. Dado que la climatología de la zona se caracteriza por precipitaciones escasas (300 mm/año aprox.) y por un déficit hídrico constante que provoca que los niveles freáticos estén bastante profundos, se consideró un grado de saturación de la superficie de rotura $m=0$. Por otra parte, se consideró un espesor medio de la masa inestable de $t=2$ m.

La estimación del desplazamiento de Newmark se ha realizado considerando los siguientes escenarios sísmicos:

Escenarios Probabilistas

Mapa de aceleración máxima horizontal en roca (PGA) para periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años (Benito *et al.*, 2006; García-Mayordomo *et al.*, 2007).

Escenarios Deterministas

- Terremoto más probable para PR 475 años. Con base en el trabajo de García-Mayordomo *et al.*, 2007 se considera la ocurrencia de un terremoto de $M_w=5.0$ a distancia cero km en cada punto de la cuenca.

- Rotura del segmento Lorca-Totana de la Falla de Alhama de Murcia (García-Mayordomo, 2005). Se modeliza la ocurrencia de un terremoto de $M_w=6.7$ con epicentro variable a lo largo de la traza del segmento.

- Rotura del segmento Puerto Lumbreras-Lorca de la Falla de Alhama de Murcia. Ídem que el caso anterior pero con $M_w=6.8$.

En los escenarios deterministas el valor de la PGA se ha calculado con la función de atenuación de Sabetta y Pugliese (1996) para roca. La PGA en roca se ha transformado a PGA en suelo considerando los factores de amplificación obtenidos en el proyecto RISMUR (Benito *et al.*, 2006). Así mismo, se ha considerado un factor de amplificación topográfico, función de la altura relativa del relieve en crestas y de la pendiente, de acuerdo con las recomendaciones del Eurocódigo-8.

Finalmente, los desplazamientos de Newmark se han obtenido empleando la ecuación empírica de Jibson (2007), donde D_N es función del ratio K (a_c/PGA). Esta ecuación tiene una alta significación estadística ($R=84\%$) y es la que mejores resultados aporta, sobre todo en el rango de valores de K de 0.2 a 0.8.

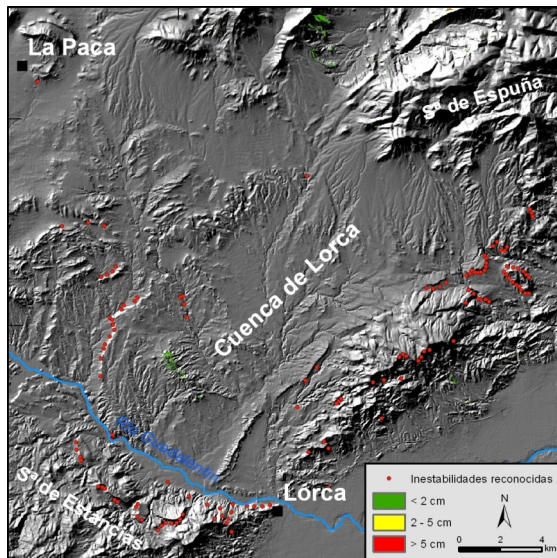


FIGURA 2. Desplazamientos de Newmark para un periodo de retorno de 475 años.

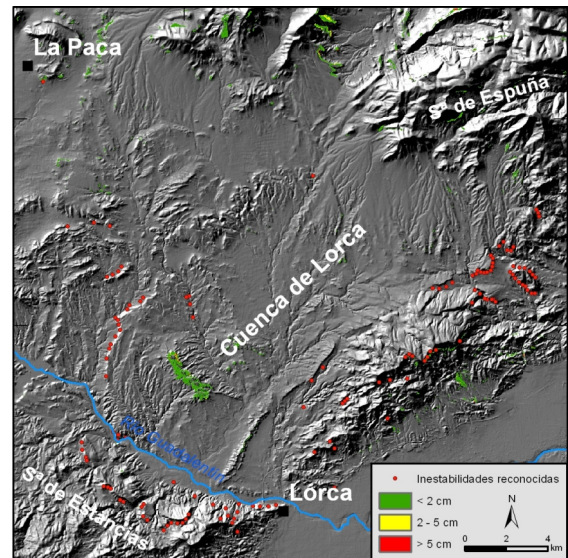


FIGURA 5. Desplazamientos de Newmark para el terremoto más probable para periodo de retorno de 475 años ($M_w=5.0$).

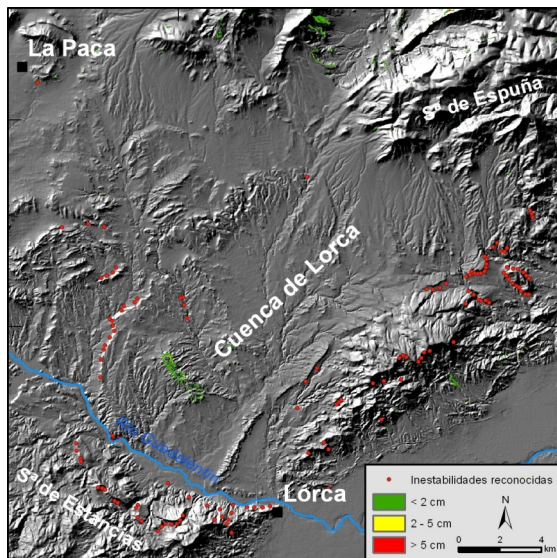


FIGURA 3. Desplazamientos de Newmark para un periodo de retorno de 975 años.

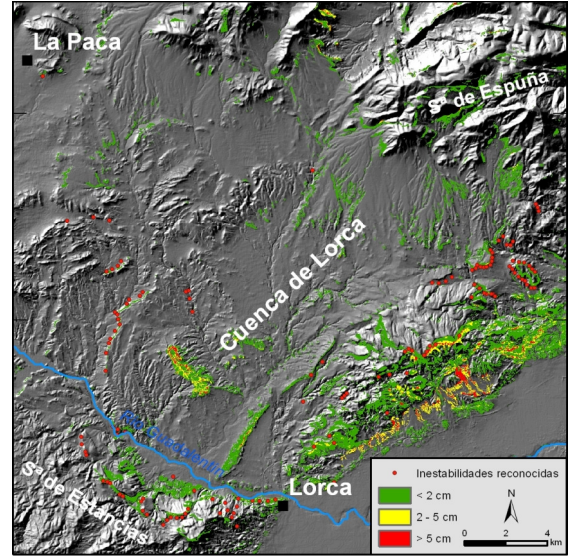


FIGURA 6. Desplazamientos de Newmark para la rotura del segmento Lorca-Totana de la Falla de Alhama de Murcia ($M_w=6.7$).

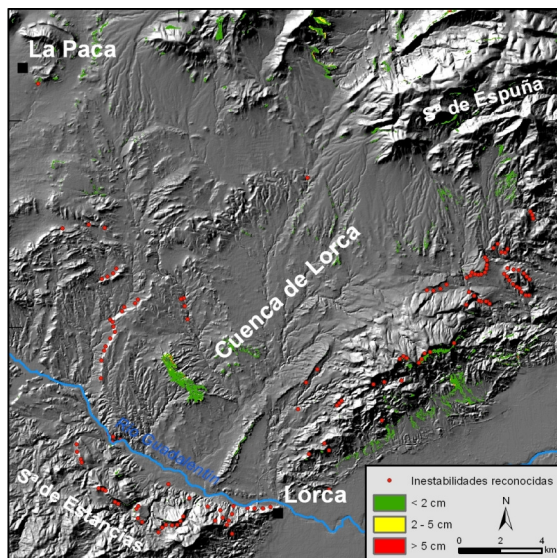


FIGURA 4. Desplazamientos de Newmark para un periodo de retorno de 2475 años.

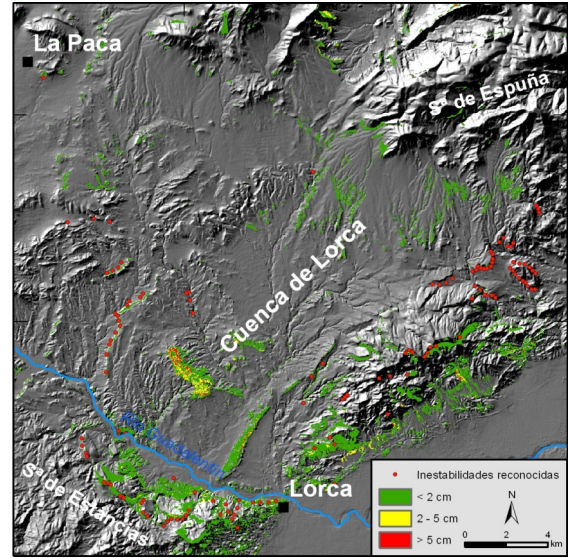


FIGURA 7. Desplazamientos de Newmark para la rotura del segmento Puerto Lumbreras-Lorca de la Falla de Alhama de Murcia ($M_w=6.8$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las figuras 2 a 7 se muestran los resultados obtenidos para los diferentes escenarios considerados. También se indica la localización de inestabilidades identificadas en campo (IGME, 1995). Por motivos de espacio sólo se muestra en este artículo la parte correspondiente al cuadrante SW de la Cuenca de Lorca.

Para los escenarios probabilistas los desplazamientos de Newmark obtenidos presentan valores muy bajos. La mayoría son menores de 2 cm, aunque en algunos puntos pueden ser mayores de 5 cm (Figs. 2, 3 y 4). Los desplazamientos de Newmark se distribuyen espacialmente en áreas dispersas de pequeño tamaño, las cuales van expandiéndose al aumentar el periodo de retorno considerado. El escenario determinista del terremoto más probable para PR 475 años (Fig. 5) produce unos resultados similares al probabilista de PR 2475 años.

Los desplazamientos de Newmark más elevados se producen con los escenarios deterministas que implican la rotura de los segmentos de la Falla de Alhama de Murcia (Figs. 6 y 7). En estos casos, los valores obtenidos son, con mucha frecuencia, mayores de 2 cm y, localmente, mayores de 5 cm. Además, se distribuyen en áreas mucho más extensas, incluyendo las laderas generadas por el encajamiento de la red de drenaje. El grupo litológico más susceptible a inestabilidades inducidas por terremotos es el formado por arcillas, limos y conglomerados de edad Plioceno-Cuaternario.

Los desplazamientos de Newmark obtenidos deben considerarse como un índice de inestabilidad potencial. Desplazamientos superiores a 5 cm implican potencialmente la aparición de deslizamientos coherentes, mientras que desplazamientos inferiores son característicos de desprendimientos (cf. Romeo, 2000). En cualquier caso, dado que estos valores pueden tener una dependencia muy fuerte según las características del territorio estudiado y de los materiales considerados, es necesario contrastarlos con datos locales de campo. En nuestro caso, observamos que el desprendimiento de La Paca se localizó en una zona donde todos los escenarios, a excepción del probabilista para PR 475 años, predicen desplazamientos de Newmark inferiores a 2 cm. Este dato, si bien necesita ser contrastado en más localizaciones, sugiere que desplazamientos de Newmark de tal orden podrían dar lugar a desprendimientos similares en la Cuenca de Lorca.

CONCLUSIONES

La metodología de Newmark, implementada mediante un SIG, se revela como una técnica sencilla y relativamente fiable para evaluar a nivel regional la susceptibilidad de las laderas a inestabilidades producidas por terremotos. Los mapas obtenidos permiten identificar áreas de potencial riesgo, así como localizar áreas de interés para posteriores estudios de detalle.

De acuerdo con los resultados alcanzados en este estudio, las inestabilidades de laderas inducidas por terremotos futuros en la Cuenca de Lorca serán fundamentalmente de tipo desprendimiento, particularmente caídas de rocas. Esto ocurre en emplazamientos con desplazamientos de Newmark menores de 2 cm. Únicamente en el supuesto de que ocurra un gran terremoto ($M_w=6.7-6.8$) es previsible que se produzcan inestabilidades de mayor tamaño afectando áreas extensas, así como deslizamientos de tipo coherente. Esto ocurriría en zonas con desplazamientos de Newmark de 2 o más centímetros.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias al Proyecto TOPOIBERIA CONSOLIDER-INGENIO CSD2006-00041 y al Proyecto de Investigación de Excelencia RNM-327 de la Junta de Andalucía.

REFERENCIAS

- Benito B., Gaspar-Escribano J.M., García-Mayordomo J., Jiménez M.E., García Rodríguez, M.J. (2006): *Proyecto RISMUR: Evaluación de la peligrosidad sísmica*. Instituto Geográfico Nacional y Protección Civil de Murcia, Madrid.
- García-Mayordomo, J. (2005). *Caracterización y Análisis de la Peligrosidad Sísmica en el Sureste de España*. Tesis Doctoral UCM, 373 pp.
- García-Mayordomo, J., Gaspar-Escribano, J.M. y Benito, B. (2007): Seismic hazard assessment of the Province of Murcia (SE Spain): analysis of source contribution to hazard. *Journal of Seismology*, 11(4): 453-471.
- IGME (1995): Atlas Inventario de Riesgos Naturales de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Consejería de Política Territorial y Obras Públicas de la Región de Murcia.
- Jibson, R.W. (2007): Regression models for estimating coseismic landslide displacement. *Engineering Geology*, 91: 209-218.
- Jibson, R.W., Harp, E.L. y Michael, J.A. (1998): A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. U.S. Geological Survey Open-File Report, 98-113, 17 pp.
- Newmark, N.M. (1965): Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, 15: 139-160.
- Rodríguez-Peces, M. J. (2008): *Evaluación regional de inestabilidades de ladera por efecto sísmico: mapas de desplazamiento de Newmark para la Cuenca de Lorca (sureste de España)*. Tesis de Máster de Ingeniería Geológica. Univ. Complutense de Madrid, 96 pp.
- Romeo, R. (2000): Seismically induced landslide displacements: a predictive model. *Engineering Geology*, 58: 337-351.
- Sabetta, F. y Pugliese, A. (1996): Estimation of Response Spectra and Simulation of Nonstationary Earthquake Ground Motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86 (2): 337-352.